

超伝導薄膜に何が期待できるか

岡 部 洋 一*

Prospects of Superconducting Films

Yoichi OKABE*

Key Words : Oxide Superconductor, Electro-magnetic Shield, Superconducting Wiring, Superconducting Devices

酸化物超伝導薄膜は電磁シールド、超伝導配線、高感度磁気センサ、超高速電子デバイスと広範なエレクトロニクスへの応用分野を持っている。高い臨界温度がどのように応用に役立つのか、また、現在の薄膜の特性を応用のレベルにまで上げるには、何を解決すべきかについて論ずる。

1. はじめに

酸化物超伝導体の薄膜は、その特性の再現性がよくないこと、他のプロセスとの整合性がよくないことなど、いくつかの解決すべき問題があることから、まだ必ずしも実用の域に達していない。

しかし、その高い臨界温度から、電磁シールド、電子回路の配線、超伝導デバイスなど、特に超高感度、超高速を目標としたエレクトロニクス分野への応用が期待されている。

このような、多方面の応用分野を有する材料の開発は是非とも解決すべきであり、本稿は、エレクトロニクス応用の立場から、具体的にどのような応用があるか、なぜ酸化物超伝導体薄膜が有用であるか、また、それを応用に結びつけるには、何を解決すべきかについて論じる。

2. マイスナー効果の応用

超伝導体の特長は、マイスナー効果に基づく磁気遮へい作用、電気抵抗がゼロであること、巨視的量子効果が現れることである。これに加え、酸化物超伝導体では高い臨界温度という特長が付け加わる。

まず、磁気遮へい作用の応用としては電磁シールドが期待されている。かつて、金属系超伝導体でも、電磁シールドは作られていたが、高価な液体ヘリウムで冷却をする必要から、数立方cmからたかだか数十立方cmの体積

をシールドするのが常識であった。しかし、酸化物超伝導体では、液体窒素で冷却できることから、大きな支持体に薄膜をコーティングし、大きな物は数立方mの体積内を電磁シールドできるようになりつつある。現在すでに人間を囲む程度の円筒状のシールドが発表されている。

3. ゼロ抵抗の応用

抵抗ゼロの超伝導線は電力送電や超伝導磁石として期待されているが、集積回路の内部あるいは集積回路間の配線としても期待されている。こうした配線は従来の集積回路やプリント基板と同様薄膜で構成されるであろう。

現在の半導体の動作速度は半導体のON抵抗と次段ゲートの静電容量の積である時定数で決定される。しかし、さらに集積度や動作速度が上がっていくと、半導体の抵抗よりも配線の抵抗の方が効いてくるようになる。このような場合には、抵抗ゼロの配線は極めて有効となる。

超伝導配線は、すでにジョセフソン回路で使われてきたが、その場合、配線はむしろ伝送線路として働き、基板との間の誘電率と電子の慣性に基づく透磁率の積で決まる伝播速度で伝わる電磁波の導波路となる。

液体ヘリウム温度では通常の半導体は縮退してしまい、絶縁物になってしまうことが多いが、液体窒素温度では、こうした問題が起きない。液体窒素でも半導体を漬けることは嫌われることが多かったが、最近では別の要因からこうした方向がやむを得なくなっている。

それは集積度を一層上げようとすると、素子一つ当たりの消費電力を下げざるを得ないことからきている。消費電力を下げると熱雑音などの環境温度の影響が問題となってくる。つまり、素子周辺温度の低温化が必要条件となってくる。

これらの理由から将来、超伝導薄膜配線は有望と考えられている。

* 東京大学先端科学技術研究センター（〒153 東京都目黒区駒場4-6-1）

Res. Center for Advanced Sci. and Tech., Univ. of Tokyo
(6-1, Komaba 4-chome, Meguro-ku, Tokyo 153)

4. 巨視的量子効果の応用

超伝導電子がクーペーペアを組むためにあたかもボーズ粒子のように働き、その結果、光のような波動の概念を持った巨視的な量子波として働くことが知られている。

この一番顕著な例がリング状の超伝導体に沿った波動である。波動であるから位相の概念があり、一周で位相が 2π の整数倍でしか変化し得ない。このとき電流が流れ、それに対応して丁度 $h/2e$ の整数倍の磁束が、この超伝導リングに錯交することになる。

このときリング状に2箇所超伝導性の弱い領域を作っておくと、磁束を整数倍から若干ずらすことが可能となる。この際、無理をかけた結果、リング全体の電気回路的特性は、無理をかけないときからずれることとなる。このずれを電氣的に検知することにより、リングに錯交する磁束の量、つまり、リング付近の磁界の強さを検出することができる。

これが、SQUIDと略称される超伝導量子干渉素子の原理である。この素子の磁気感度は現存する他のいずれの磁気センサよりも高く、また、生体の脳などの神経活動の作り出す極めて弱い磁界をも検知できることから、SQUID-CTとしての将来を嘱望されている。

脳波の場合は源を出た電流が、複雑な抵抗率変化をする媒質を通過してくるのに対し、脳磁波は外部も含めて一様な磁気媒質を伝わってくるため、源の位置推定が容易であるという特長を持っている。

SQUIDの場合も、液体窒素温度以上という高臨界温度が、クライオスタット、電子回路といった周辺技術を容易にしてくれる。液体ヘリウム環境に比べ熱雑音が高くなるという心配もあるが、生体磁気のような低周波帯では環境温度に依存しない $1/f$ 雑音が支配的になるので、この問題は比較的無視できる。

$1/f$ 雑音は、酸化物超伝導体の場合、薄膜にトラップされた磁束がじわじわと動くフラックスクリープという現象から発生することが多く、むしろこのことの方が、現在は大きな問題である。このクリープ現象は膜質がよくなるにつれ、徐々に減ってきており、また、膜に直接大きな外部磁界がかからないようにするなどの工夫により徐々に改善されつつあり、将来が期待される。

5. 電子デバイス応用

SQUIDリングの一部に挿入された超伝導性の弱いところは、ジョセフソン素子と呼ばれる。これを超伝導リングとは独立に、単独で用いても興味ある動作を行う。

こうした素子を安定に作るには、超伝導体と超伝導体の間にごく薄い絶縁体を挟み、それを介して互いにトンネル効果で結合させるのがよい。こうした素子をトンネル型ジョセフソン素子と呼ぶ。

また、超伝導体の一部を極めて細くしたり、薄くしたりして、超伝導を弱めた素子も用いられる。さらに、超伝導体間を半導体や常伝導体で結合した素子も用いられる。これらは、すべて弱結合型ジョセフソン素子と呼ばれている。

金属超伝導体の場合、特によく使われる鉛やニオブの場合は、当初弱結合型の素子がよく作られたが、次第に安定で理想的な特性を持つトンネル型の素子に置き換えられた。

安定なトンネル型の素子が容易に作られるようになってからは、これを用いて電子回路、特に半導体よりも超高速で動作するデジタル回路が開発されるようになった。これはIBMが創始者であるが、その後同社は撤退し、現在では日本がもっともリードしている。

この素子の動作は、基本的には量子磁束の移動と関係している。量子磁束がある時間でジョセフソン素子を抜けると、素子の両端に電圧が発生する。逆に電圧をかけると、量子磁束を駆動するから、量子磁束/電圧で素子の動作時間を見積もることができる。電圧は高ければ高いほど高速動作が期待できることになる。ところが素子両端にはギャップ電圧と呼ばれる電圧以上はかけることができない。この電圧は、およそ両側の超伝導体の臨界温度の和に比例する。ニオブの場合、臨界温度は9Kであるが、YBaCuOの場合、約10倍であるから、その分高速で動作することが期待できる。

もちろん、この話は、静電容量のような寄生素子の影響は無視した雑な議論であるが、理想的な素子ができるようになれば、酸化物超伝導体には大きな期待がかけられよう。

酸化物超伝導体のジョセフソン素子でも金属超伝導体と同様な歴史をたどることになると思われるが、残念ながらまだ理想的な特性を持つジョセフソン素子はいずれの型でも得られていない。

ジョセフソン素子以外の制御電極を持った超伝導三端子素子もいくつか提案されており、主なものだけで十程度の種類はある。いくつかポテンシャルの高いものもあるが、残念ながらジョセフソン素子程度安定に作られ、かつジョセフソン素子よりもよい特性の得られたという実績を持ったものはまだない。

これらの素子は従来金属超伝導体を用いて作られてきたが、原理的に半導体と組み合わせたものが多い。半導体はバンドギャップなどに現れる電圧が、およそ1Vの桁である。これに対し、金属超伝導体ではギャップ電圧に見られるように1mVのオーダーであり、接合部のバンド合わせが困難であった。酸化物超伝導体では、これが数10mVとなるため、接合部の設計はかなり楽になることが予測され、期待されている。

6. エレクトロニクス応用のための薄膜作製

以上のように酸化物超伝導体はエレクトロニクス応用を考えた場合、かなり期待できる材料である。しかし、問題点も多い。材料自身の問題もあるし、現在のプロセスからくる問題もある。

まず、材料固有の問題であるが、異方性である。いずれの酸化物材料もc軸方向に電流が流れやすく、いわゆる2次元的な材料である。この結果、SQUIDや電子回路を構成する場合には、c軸を立てない限り2次元的な配線を行うことができない。

一方、ジョセフソン素子などの、電子デバイスは半導体以来縦方向に形成するのが常識である。これは縦方向は膜を積んでいくため微細構造が作りやすく、横方向はリソグラフィーの精度で決定されてしまうからである。ところが、c軸方向にはほとんど電流が流れないため、どうしても精度の悪い横方向の素子（エッジジャンクション）を作らねばならなくなる。

双晶境界などに発生する電気的なバリアも困りものである。これのために、本来期待した場所と異なるところに、天然のジョセフソン素子が形成されてしまうからである。もっとも、これを積極的に作って、そのままジョセフソン素子として利用することも多く試みられている。

この境界は、磁束のトラップセンターにもなり、フラックススクリープの原因となる。フラックススクリープは、SQUIDでも問題になるが、磁気シールドや配線でも問題となる。多結晶の膜の場合は結晶粒界がさらにトラップセンターとなり、クリープ現象はより顕著になるので、なるべく結晶性を持つ薄膜を作る必要があることはいうまでもない。

プロセス的には低温成長が必須である。最下部に置かれる薄膜はどのように形成してもかまわないが、素子構造で上部に置かれる膜、あるいは素子形成で後の方に形成される膜は、できる限り低い温度で形成する必要がある。例えば、ジョセフソン素子で使われるトンネル絶縁膜の厚さは数nmしかない。この膜を壊さないように対向の超伝導膜を形成するには金属系の場合は170度程度が限度であった。材料の選択でこの温度は上げられるかも知れないが、たかだか300度程度が限界ではないかと思われる。

超伝導体の成膜温度を下げるか、トンネル膜形成後には超伝導膜をつけないようなプロセスを考えることが必要となる。あるいは高温でも構造の壊れないようなよほどよい材料の選択を行うことになるだろう。

7. 界面の制御

電子デバイスでは何種類もの材料を使うので、これらの界面がよくないとどうにもならない。例えばシリコンは酸化シリコンというアモルファス材料との組み合わせでよい界面を得ているし、ヒ化ガリウムではガリウムとアルミニウムの置換により格子整合のよくとれたよい界面を得ることに成功した。ニオブジョセフソン素子では不整合格子である酸化アルミがよい界面を形成している。

このように、まずよい材料の組み合わせが大事である。しかし、この3例に見られるように、アモルファスがよいのか、格子整合がよいのか、格子不整合がよいのか、材料の選び方に明白な指導原理は見いだせない。ある程度、運的な要素が感じられる。

材料の組み合わせ以前に、母材の物理的な条件も必要である。表面の平坦性はどうしてもよくなくてはいけない。さらに表面の濡れ性がよくないといけない。酸化物超伝導体は一般に濡れ性がよくないようである。このため、薄い絶縁膜を積むと島状構造になりやすい。

表面の電気的特性が中心のバルクの特性と等しいといった基本的なことも重要である。酸化物超伝導体は、この条件が成立しづらいようである。特にYBaCuOの表面は、簡単に酸素が不足したり過剰になるようである。このため、真空槽で成膜後そのまま槽内で次のプロセスを続けるなどの工夫もとられるようである。

成膜時のダメージも表面の特性を劣化させる。例えば、スパッタ法は、プラズマの衝撃によるダメージを受けやすい。これを減らすようにし、また可能であれば、なるべくダメージの少ないプロセスを採用する必要があるだろう。

8. むすび

酸化物超伝導薄膜は特にエレクトロニクスの応用が期待されている。液体ヘリウム温度が液体窒素温度になるといったこと以外にも高速性や半導体との整合などの特長を持っている。しかし、現状の膜はまだ、問題が多い。特に、表面界面の特性には改良の余地が多い。さらに他の材料との相性といった点も無視できない。こうした点を踏まえ、広範な応用に結びつく成膜技術を確認したいものである。

(1991-3-19 受理)